

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.123

Рег. № 122041100018-6

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯИ РАН,  
чл.-корр. РАН

М.В. Либанов

«28» декабря 2024 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**  
122041100018-6  
ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ; ФИЗИКА ПУЧКОВ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
(итоговый за 2024 год)  
ФЦП

Руководитель НИР,  
Заместитель директора ИЯИ РАН,  
д.ф.-м.н.

А.В. Фещенко  
«28» декабря 2024 г.

Москва 2024 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

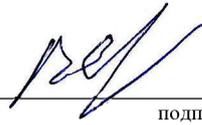
Руководитель НИР,  
Зам. директора по научной  
работе, д-р. физ.-мат. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

А.В.Фещенко  
(введение, раздел 1, 2, 3, заключение)

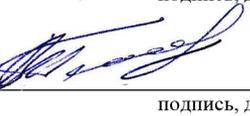
Исполнители:

Главный инженер Отдела  
ускорительного комплекса

  
28.12.2024  
подпись, дата

В.Л.Серов  
(введение, раздел 1,2, заключение)

Вед. науч. сотр.,  
д-р. физ.-мат. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

В.В.Парамонов  
(введение, раздел 3)

Вед. науч. сотр.,  
д-р. физ.-мат. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

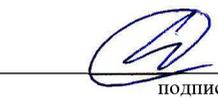
Ю.В.Сеничев  
(введение, раздел 3)

Зав. лабораторией,  
канд. физ.-мат. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

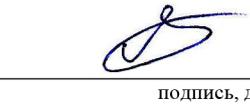
А.С. Белов  
(введение, раздел 1,2,3)

Зав. лабораторией,  
канд. физ.-мат. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

С.А. Гаврилов  
(введение, раздел 1,2,3)

Зав. сектором

  
28.12.2024  
подпись, дата

В.Е.Лоскутов  
(раздел 1, 2)

Зав. сектором,  
канд. техн. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

Ю.Ж.Калинин  
(раздел 1, 2, 3)

Зав. сектором,  
канд. техн. наук

  
28.12.2024  
подпись, дата

А.И.Кваша  
(раздел 1, 2)

Зав. сектором

  
28.12.2024  
подпись, дата

В.Н.Леонтьев  
(раздел 1, 2)

Науч. сотр.

  
28.12.2024  
подпись, дата

В.С.Кленов  
(раздел 1, 2,3)

Начальник установок

  
28.12.2024  
подпись, дата

А.Н.Набока  
(раздел 1, 2)

Начальник установок

  
28.12.2024  
подпись, дата

В.Б.Калихов  
(раздел 1, 2)

Начальник установок

  
28.12.2024  
подпись, дата

А.М.Прус  
(раздел 1, 2)

Ведущий инженер по  
эксплуатации ускорителя

  
28.12.2024  
подпись, дата

И.М.Жвакин  
(раздел 1, 2)

Ведущий инженер по  
эксплуатации ускорителя



28.12.2024

подпись, дата

В.С.Копин  
(раздел 1, 2)

Нормоконтроль



28.12.2024

подпись, дата

О.Н. Либанова

## РЕФЕРАТ

Отчет 44 с., 1 кн., 27 рис., 3 табл., 14 источн., 1 прил.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, СИСТЕМЫ ВЧ ПИТАНИЯ, СИСТЕМЫ АВТОРЕГУЛИРОВАНИЯ, СИСТЕМЫ НИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ.

Объектами исследования являются ускорители заряженных частиц, системы и элементы ускорителей.

Цель работы – поддержание работоспособности сильноточного линейного ускорителя протонов и каналов транспортировки пучков экспериментального комплекса ИЯИ РАН, повышение надежности и устойчивости его работы, модернизация систем ускорителя и экспериментального комплекса, повышение параметров и расширение возможностей ускорителя, разработка новых ускорителей и элементов ускорителей.

В процессе и в результате выполнения НИР обеспечена работа сильноточного линейного ускорителя ионов водорода в двух сеансах общей продолжительностью 360 часов, направленных на выполнение государственного задания, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. Успешная работа ускорителя стала возможной благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя, причем объем этих работ из-за ограничений в работе ускорителя в отчетный период был существенно расширен по сравнению с предыдущими годами. Также выполнен ряд работ по разработке новых ускорителей, систем и элементов ускорителей для других ускорительных центров.

Все проводимые работы находят непосредственное практическое применение на сильноточном линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН либо имеют практическую направленность при их выполнении в сотрудничестве с другими ускорительными центрами.

Значимость выполненных работ определяется тем, что в результате их выполнения обеспечивается успешная работа и проведение исследований на единственном в России и крупнейшем в Евроазиатском регионе сильноточном линейном ускорителе ионов водорода.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ .....	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН .....	9
2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН.....	19
2.1. Разработка и создание стенда источника протонов.....	19
2.2. Разработка и создание стенда отрицательных ионов водорода .....	23
2.3. Модернизация других систем ускорителя .....	24
3. Разработка и создание ускорителей и их элементов .....	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г. ....	43

## ВВЕДЕНИЕ

### 1. Задача «Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН».

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и совместно с экспериментальным комплексом является уникальной установкой национального и международного значения. Он является единственным в России ускорителем данного класса и самым крупным линейным ускорителем ионов водорода в Евроазиатском регионе. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2024 года проведено 157 сеансов, общей продолжительностью 53956 часов, в том числе 2 сеанса продолжительностью 360 часов в 2024 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В настоящее время максимальная энергия пучка, которую может обеспечивать ускоритель, составляет 345 МэВ.

В 2024 году в первом сеансе работы велись на нейтронный источник РАДЭКС, комплекс протонной терапии и на экспериментальный стенд с энергиями 267 МэВ и 160 МэВ. В зависимости от задачи интенсивность пучка изменялась от 100 нА при работе на комплекс протонной терапии до десятков микроампер среднего тока при работе на РАДЭКС, а длительность импульса – от 0,3 мкс до 150 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до десятков герц. Для исследований по флэш терапии при работе на комплекс протонной терапии формировались одиночные импульсы высокой интенсивности. Второй сеанс был посвящен комплексной наладке оборудования и систем ускорителя, исследованиям режимов работы и настройке ускорителя. Работы велись с малой интенсивностью пучка.

Относительно небольшое по сравнению с предыдущими годами количество проведенных сеансов и их суммарная длительность в отчетный период были обусловлены авариями в системе оборотного водоснабжения, в том числе на трубопроводах системы и трубопроводе подпитки системы от очистных сооружений города. Существенное ограничение на режимы работы ускорителя оказало окончание срока действия разрешения Ростехнадзора на выбросы радиоактивных веществ в атмосферу и необходимость разработки нового Проекта нормативов выбросов и новой Инвентаризации источников выбросов в связи с изменением требований к проектной документации, а также методик и рекомендаций. Работа ускорителя велась в режимах, исключая регистрируемые выбросы.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя, причем объем этих работ из-за ограничений в работе ускорителя в отчетный период был существенно расширен по сравнению с предыдущими годами.

## **2. Задача «Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН».**

Основной объем оборудования ускорителя был изготовлен в 80-х годах прошлого столетия. Для обеспечения работы ускорителя постоянно проводятся работы по модернизации. Описаны работы по модернизации систем ускорителя, выполненные в 2024 году. Велись работы по модернизации источников протонов и отрицательных ионов водорода. Для выполнения этих работ, а также работ по созданию новых источников начато создание двух исследовательских стендов. Среди других работ по модернизации ускорителя следует выделить модернизацию системы синхронизации, системы ВЧ питания, системы питания электромагнитного оборудования, системы управления, системы терморегулирования собственной частоты ускоряющих резонаторов, вакуумной системы, системы быстрой аварийной защиты и других систем.

## **3. Задача «Разработка и создание ускорителей и их элементов».**

В процессе сооружения, запуска, эксплуатации и модернизации ускорителя был достигнут уникальный уровень понимания процессов в ускорителе и накоплен огромный опыт решения практических задач. Это обеспечило международное признание авторитета сотрудников Института и широкое применение их разработок не только в ИЯИ РАН, но и в ведущих ядерно-физических ускорительных научных центрах России и всего мира.

Среди выполненных в 2024 году работ следует отметить выполненные в сотрудничестве с ОИЯИ в рамках проекта NICA работы по разработке плазменного перезарядного ионизатора для источника поляризованных дейтронов и протонов, а также по исследованию особенностей управления поляризацией в области целочисленного спинового резонанса и в области высокочастотного спинового резонанса. В сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский Институт» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» велись работы по разработке устройств и систем диагностики пучка для линейных ускорителей ионов и изготовление отдельных устройств. Продолжались исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя на энергию 230 МэВ для протонной терапии, а также исследования и разработка эффективных ускоряющих структур для линейных ускорителей ионов. Также была предложена и разработана новая схема ускорителя прямого действия с использованием последовательности источников

напряжения с индивидуальным электрическим питанием этих источников от фотоэлектрических преобразователей, получен патент на изобретение.

В рамках сотрудничества ИЯИ РАН и Институтом современной физики, Китайская Академия Наук, проводились работы по разработке источника поляризованных ионов для Института современной физики, включая исследования на стенде источника поляризованных ионов в ИЯИ РАН.

## 1. Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и совместно с экспериментальным комплексом является уникальной установкой национального и международного значения. Он является единственным в России ускорителем данного класса и самым крупным линейным ускорителем ионов водорода в Евроазиатском регионе. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2024 года проведено 157 сеансов, общей продолжительностью 53956 часов, в том числе 2 сеанса продолжительностью 360 часов в 2024 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В настоящее время максимальная энергия пучка, которую может обеспечивать ускоритель, составляет 345 МэВ.

В 2024 году в первом сеансе работы велись на нейтронный источник РАДЭКС, комплекс протонной терапии и на экспериментальный стенд с энергиями 267 МэВ и 160 МэВ. В зависимости от задачи интенсивность пучка изменялась от 100 нА при работе на комплекс протонной терапии до десятков микроампер среднего тока при работе на РАДЭКС, а длительность импульса – от 0,3 мкс до 150 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до десятков герц. Для исследований по флэш терапии при работе на комплекс протонной терапии формировались одиночные импульсы высокой интенсивности. Второй сеанс был посвящен комплексной наладке оборудования и систем ускорителя, исследованиям режимов работы и настройке ускорителя. Работы велись с малой интенсивностью пучка.

Относительно небольшое по сравнению с предыдущими годами количество проведенных сеансов и их суммарная длительность в отчетный период были обусловлены авариями в системе обратного водоснабжения, в том числе на трубопроводах системы и трубопроводе подпитки системы от очистных сооружений города.

Существенное ограничение на режимы работы ускорителя оказало окончание срока действия разрешения Ростехнадзора на выбросы радиоактивных веществ в атмосферу и необходимость разработки нового Проекта нормативов выбросов и новой Инвентаризации источников выбросов в связи с изменением требований к проектной документации, а также методик и рекомендаций. Эти изменения потребовали неоднократной переработки указанных документов с учетом замечаний как Ростехнадзора, так и экспертной организации. По состоянию на декабрь 2024 года окончательные варианты указанных

документов (рисунок 1) разработаны сотрудниками Института, приняты Ростехнадзором и направлены им в экспертную организацию.

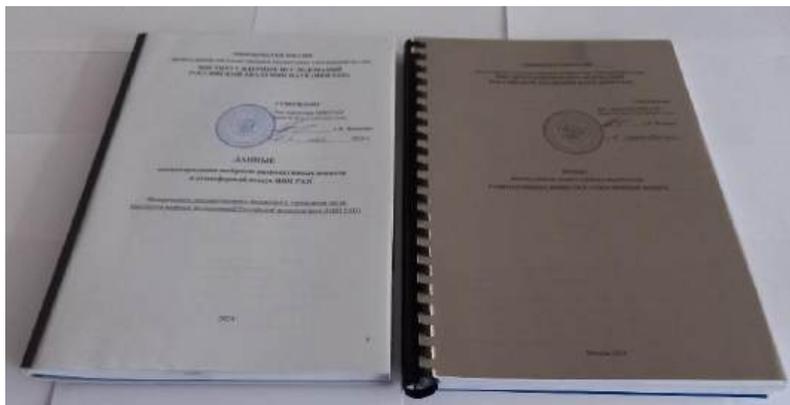


Рисунок 1 – Общий вид документов, поданных в Ростехнадзор для получения разрешения на выбросы радиоактивных веществ

При работе ускорителя для недопущения выбросов радиоактивных веществ в атмосферу велись непрерывные наблюдения радиационного фона, данные о котором доступны в онлайн режиме на сайте <https://radioalt.inr.ru/> (рисунок 2).

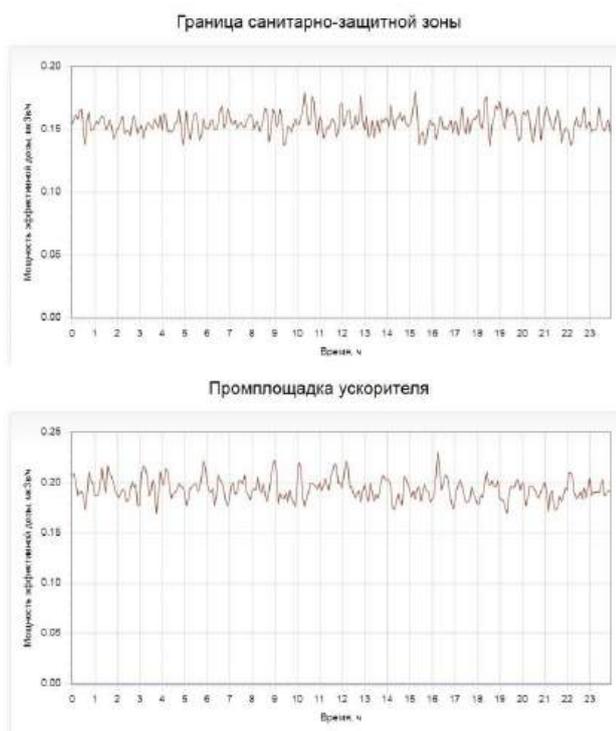


Рисунок 2 – Информация о радиационном фоне

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя, причем объем этих работ из-за

ограничений в работе ускорителя в отчетный период был существенно расширен по сравнению с предыдущими годами.

Среди работ по техническому обслуживанию и ремонту систем ускорителя следует отметить работы по замене трубки дрейфа № 218 во втором резонаторе (рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид второго ускоряющего резонатора с трубками дрейфа в тоннеле ускорителя

Новая трубка дрейфа была изготовлена в АО «НПП «Торий» в рамках программы обновления приборной базы ведущих организаций, выполняющих научные исследования и разработки (рисунок 4).



Рисунок 4 – Изготовленная трубка дрейфа №318 в упаковочной таре

Несмотря на в целом высокое качество изготовления было обнаружено отклонение длины трубки в минус в среднем на 0,58 мм при номинальном размере 289,85 мм. При этом магнитные характеристики встроенной квадрупольной линзы были в пределах допуска. Для принятия решения о возможности установки такой трубки в резонатор были

проведены электродинамические расчеты одного периода резонаторы (рисунок 5) и найден уход его резонансной частоты, составивший +246 кГц.

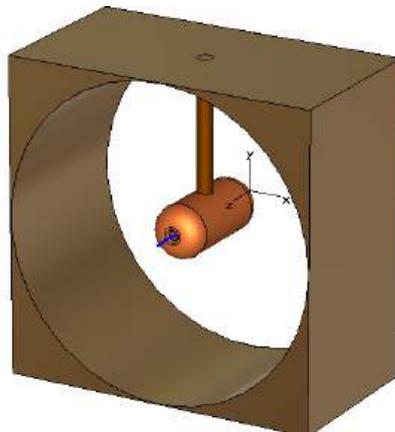


Рисунок 5 – Модель периода ускоряющего резонатора

Пересчет на весь резонатор с учетом соотношения длины периода и общей длины резонатора дает смещение резонансной частоты 5,87 кГц. В принципе такое изменение резонансной частоты может быть скомпенсировано уменьшением рабочей температуры трубок дрейфа примерно на 2°C, что технически реализуемо, однако при этом существует опасность искажения пространственного распределения электрического поля рабочего вида колебаний, которое настраивалось на этапе радиотехнической настройки резонаторов более тридцати лет назад и проверить которое в настоящее время не представляется возможным. Для уменьшения/исключения искажений поля уход резонансной частоты должен компенсироваться локально на участке возмущения. Для компенсации был выбран ближайший ручной элемент настройки. Экспериментальное значение чувствительности резонансной частоты к изменению длины элемента настройки для данного резонатора составляет 3,0 кГц/см, то есть для компенсации величины 5,87 кГц необходимо выдвинуть элемент настройки на 2 см. К счастью, диапазон перемещения элемента позволил это сделать даже без его подрезки. Работы по замене трубки дрейфа проводились в течение двух месяцев с конца августа до конца октября. За это время температура в ускорителе менялась в диапазоне от 19,6°C до 14,5°C. Также менялось атмосферное давление и влажность воздуха. Это создавало сложности с контролем резонансной частоты на отдельных этапах работ. Тем не менее, все поправки были учтены и после восстановления резонатора рабочие температуры как трубок дрейфа, так и корпуса, соответствующие резонансу, вернулись к значениям, которые были ранее, что подтвердило корректность учета.

Юстировка трубки проводилась по двум соседним трубкам. Для этого в аперттуру резонатора вносилась калиброванная разборная штанга. С помощью механизма юстировки (рисунок 6) обеспечивалось прохождение калибра через юстируемую и соседние трубки.



Рисунок 6 – Внешний вид механизма юстировки трубки дрейфа №218

Перемещением штанги вдоль оси резонатора проверялось отсутствие смещений и других трубок. Для юстировки трубки в продольном направлении использовались специальные калибры, имеющие длины, равные длинам зазоров между трубками, изготовленные из фторопласта для предотвращения повреждения торцевых поверхностей трубок.

В процессе замены трубки также была проведена ревизия состояния внутренней полости резонатора. Из обнаруженных дефектов можно отметить наличие раковин на торцевых поверхностях трубок дрейфа вследствие пробоев, нарушение охлаждения элементов настройки (рисунок 7), ослабление, перегрев и нарушение контактов стабилизирующих стержней (рисунок 8). Все найденные дефекты устранены. Был осуществлен поиск и ликвидация вакуумных течей. В результате предельный вакуум улучшился в три раза.



Рисунок 7 – Следы перегрева стационарного элемента настройки



Рисунок 8 – Пример последствий нарушения контактов стабилизирующего стержня

В течение 2024 года проводились работы по ремонту и техническому обслуживанию всех основных систем ускорителя и экспериментального комплекса: инжектор протонов, инжектор отрицательных ионов водорода, ускоряющая система, система ВЧ питания начальной части ускорителя, система ВЧ питания основной части ускорителя, электротехническая система, вакуумная система, системы охлаждения, система авторегулирования собственных частот ускоряющих резонаторов, система питания электромагнитного оборудования, система авторегулирования и стабилизации амплитуд и фаз ускоряющих полей, система диагностики пучка, система управления ускорителем, система измерения потерь пучка, система быстрой аварийной защиты.

В перерывах между сеансами при работающем инженерном обеспечении проводилось регулярное включение и наладка оборудования. Так каналы усиления систем ВЧ питания регулярно включались на ускоряющие резонаторы с целью как наладки оборудования каналов, так и тренировки и поддержания в рабочем состоянии резонаторов.

При работе на резонаторы проводится одновременное включение, проверка и наладка большинства систем ускорителя.

Все работы на ускорителе проводились с соблюдением правил техники безопасности, а также норм и правил радиационной безопасности. В частности, осуществлялась плановая поверка дозиметрических приборов, обеспечение сотрудников индивидуальными дозиметрами, для персонала группы А проводилась проверка знаний правил радиационной безопасности, проводилось измерение радиационной обстановки на ускорителе и на каналах транспортировки в экспериментальном комплексе. Проведена инвентаризация калибровочных источников, входящих в комплект дозиметрических приборов. Проведена инвентаризация конструкционных материалов (изделий, узлов, оборудования), временно выведенных из эксплуатации после облучения на линейном ускорителе и в каналах транспортировки пучка. Сотрудники, занимающиеся вопросами радиационной безопасности, прошли очередное (1 раз в пять лет) обучение по программе «Радиационная безопасность при размещении, эксплуатации, техническом обслуживании, хранении установок, содержащих источники ионизирующих излучений (генерирующие) и закрытых источников ионизирующего излучения»

Энергия пучка на выходе ускорителя определяется числом работающих ускоряющих резонаторов и соответствующих ВЧ каналов основной части ускорителя. Как отмечалось выше, в настоящее время максимальная энергия пучка, которую может обеспечить ускоритель, составляет 345 МэВ. Для получения такой энергии в настоящее время обеспечена работоспособность 18-ти каналов усиления основной части ускорителя (№ 3-1...3-11, 4-1...4-7), для чего в течение года проведен полный комплекс ремонтно-восстановительных, наладочных и регламентных работ. В 2024 году также выполнен большой объем работ на четырех ВЧ каналах №4-8...4-11, работоспособность которых должна быть обеспечена для получения энергии пучка 423 МэВ. Объем выполненных работ составляет менее половины необходимого объема, и они будут продолжены в 2025 году. Среди выполненных работ можно отметить следующие.

- Проверка исправности и замена неисправных элементов мощных высоковольтных модуляторов.
- Проверка и профилактика высоковольтных кабелей и коммутирующих устройств.
- Ремонт устройств водяного охлаждения клистронов.
- Демонтаж неисправных и монтаж новых клистронов.
- Калибровка измерителей тока и напряжения накала клистронов.
- Заливка трансформаторного масла в катодные стаканы клистронов.

- Ремонт системы вытяжной вентиляции модуляторных камер.
- Ремонт эквивалентов нагрузок модуляторов, испытания на высоком уровне напряжения.
- Ремонт подмодуляторов и устройств формирования импульсов запуска модуляторов.
- Ревизия и ремонт волноводных переключателей.
- Проверка и устранение неисправностей блокировок по водяному охлаждению ферритовых вентиляей.
- Профилактика оборудования трансформаторных подстанций, доливка трансформаторного масла в объеме 1200 л., проверка состояния трансформаторов и блоков демпфирующих цепей, проверка и ремонт блокировок.
- Ремонт зарядных дросселей модуляторов, устранение течей трансформаторного масла.
- Ремонт и установка высоковольтных выключателей нагрузки модуляторов.
- Настройка электронных и релейных защит силового и высоковольтного оборудования.
- Высоковольтные испытания и подача напряжения 10 кВ на анодные трансформаторы трансформаторных подстанций.
- Пробные включения модуляторов.

В 2024 году проводились работы и на инженерных системах линейного ускорителя. Так на системах водоохлаждения помимо регулярных регламентных работ был выполнен ремонт с переборкой и заменой комплектующих одного резервного насоса ЦНГ-69 и одного насоса Х90\85К. На втором ускоряющем резонаторе начальной части выполнен ремонт охлаждения корпуса резонатора и трубок дрейфа, а также чистка ротаметров. Выполнена чистка механических фильтров терморегулирующих установок и фильтров в нескольких системах охлаждения, а также ряд других работ. Работы на системе электропитания вследствие отсутствия сотрудников в электротехнической службе ускорителя выполнялись персоналом служб главного энергетика Института.

Регулярно выполнялись профилактические работы на оборудовании инжектора протонов. В 2024 г. надежность работы инжектора протонов при проведении сеансов ускорителя была близка к 100%.

По системе автоматизированного управления произведено обновление антивирусного программного обеспечения на серверном оборудовании. Проведена наладка оборудования АСУ на ВЧ-каналах 4-2 – 4-11 основной части ЛУ в рамках работ по увеличению энергии пучка до 423 МэВ, восстановлены системы электропитания,

синхронизации, опроса и управления на всём оборудовании АСУ. Проведен ремонт прочего оборудования АСУ для обеспечения работоспособности всех систем ускорителя. В рамках работ по обеспечению удаленного доступа к оперативным данным различных систем ускорительного комплекса продолжалась модернизация портала <http://wl.inr.ru> и электронного журнала событий в сменных сеансах работы ускорителя <https://elogouk.inr.ru>. Электронный журнал подтвердил свою эффективность и удобство использования как во время сеансов, так и для последующего анализа работы ускорителя.

Для обеспечения функционирования системы автоматического регулирования собственных частот резонаторов (АРЧТ) выполнялись работы по ремонту электронагревателей терморегулирующих установок, клапанов технической воды, сигнализаторов уровня, ячеек УБС, регуляторов тока нагревателей, блоков питания электроники, электронных ячеек. Также выполнялась профилактика ротаметров.

Основной работой, выполненной по системе, АРФА, был ремонт и профилактика механических фазовращателей, используемых для установки и регулирования фаз ускоряющих полей, с заменой прецизионных многооборотных потенциометров, служащих для определения фазового положения. Такой ремонт фазовращателей выполнялся и для системы АРЧТ, где они используются для задания и контроля рабочей точки системы стабилизации собственной частоты резонаторов по фазе отраженной волны. Помимо указанной работы выполнялись работы по профилактике и ремонту электронного оборудования и фазостабильных кабелей.

Проведен комплекс профилактических, ремонтных и наладочных работ по системе быстрой аварийной защиты, системе измерения потерь ионов, системе нейтронного мониторинга, автоматизированной системе радиационного контроля «Фрегат», системе блокировок и сигнализации, системе защитных дверей. Проводилась калибровка датчиков системы измерения потерь ионов для обеспечения возможности абсолютных измерений потерь.

По системе питания электромагнитного оборудования основные усилия были направлены на замену устаревших источников питания на новые (раздел 2), однако была обеспечена устойчивая работа и оставшихся в эксплуатации старых источников. Так на экспериментальном комплексе обеспечена надежная работа старых источников ИСТЭ-1000А/115. Для обеспечения их надежной работы проведен ремонт и доработка входящих в их состав электронных блоков МП-12. Всего отремонтировано и доработано 28 блоков (рисунок 9).



Рисунок 9 – Электронные блоки МП-12 до доработки (слева) с после (справа)

Для повышения квалификации персонала в 2024 году была организована и проведена техническая учеба в форме лекций. Занятия проводили ведущие специалисты как работающие на ускорителе, так и приглашенные. Обучение включало 15 занятий по приведенной в таблице 1 программе.

Таблица 1 – Программа технической учебы

№ лекции	Тема
1	Ускорители заряженных частиц. Общая классификация. Пример крупнейшего в мире ускорителя. Линейные ускорители. Сильноточные линейные ускорители ионов. Место ускорителя ИЯИ РАН в России и мире в своем классе.
2	Ускорительный комплекс ИЯИ РАН. Принцип работы. Состав, основные системы.
3	Система инжекции
4	Ускоряющая система
5	Система диагностики пучка и методы настройки ускорителя
6	Система ВЧ питания начальной части ускорителя
7	Система ВЧ питания основной части ускорителя
8	Системы авторегулирования (АРФА, АРЧТ)
9	Система измерения потерь, система БАЗ, система блокировок
10	Вакуумная система
11	Система фокусировки и система питания фокусирующих элементов
12	Система контроля и управления
13	Инженерные системы
14	Экспериментальные установки (изотопный комплекс, экспериментальный стенд)
15	Экспериментальные установки экспериментального комплекса (РАДЭКС, ИН-06, СВЗ, КПП)

## 2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

Основной объем оборудования ускорителя был изготовлен в 80-х годах прошлого столетия. Для обеспечения работы ускорителя постоянно проводятся работы по модернизации. Рассмотрим работы по модернизации некоторых систем, выполненные в 2024 году.

### 2.1. Разработка и создание стенда источника протонов

Стенд источника протонов создается для выполнения исследовательских работ по совершенствованию дуоплазматрона, в котором генерируется пучок протонов для линейного ускорителя ИЯИ РАН. Стенд также будет использоваться для выполнения и других работ по созданию и исследованию ионных источников, в том числе для разработки и испытаний импульсного источника протонов для ускорителей, предназначенных для протонной терапии.

Расположение оборудования стенда источника протонов показано на рисунке 10. Источник протонов (1) и высоковольтное оборудование находятся за ограждением (8). Часть блоков питания источника протонов расположена в стойке (3) на высоковольтной платформе (2). Ускоряющее напряжение подается на источник протонов, и на вв платформу с выводов вв трансформатора (4). Напряжение питания на вв платформу подается с выводов разделительного трансформатора (5). Часть блоков питания источника протонов и вакуумного оборудования расположены в стойках (6) под потенциалом земли, 7– форвакуумный насос

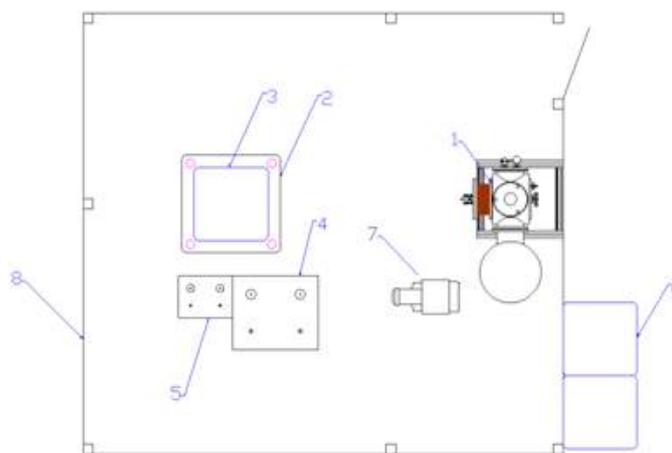


Рисунок 10 – Расположение оборудования на стенде источника протонов. 1– источник протонов, 2– высоковольтная (вв) платформа, 3– стойка с блоками питания источника протонов на вв платформе, 4– вв трансформатор импульсного ускоряющего напряжения, 5– разделительный вв трансформатор 220/220 В, 6– стойки с блоками питания источника протонов под потенциалом земли, 7– форвакуумный насос

В 2024 г. разработаны рабочие чертежи источника протонов. Детали источника изготовлены в Опытно-экспериментальном участке ИЯИ РАН. Источник находится в состоянии сборки. Общий вид источника протонов показан на рисунке 11.

Источник протонов включает источник плазмы (1) и ионно-оптическую систему формирования и ускорения протонного пучка (2), которые установлены на высоковольтном изоляторе-фланце (3) в вакуумной камере (4). Вакуумная камера откачивается высоковакуумным турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 350 л/сек (по азоту).

Поток плазмы генерируется в плазменном источнике. Импульсная расширяющаяся струя водородной плазмы инжектируется из источника плазмы и попадает на плазменный электрод ионно-оптической системы, в которой происходит формирование и ускорение протонного пучка до энергии 45 кэВ. Ускоренный пучок попадает в блок диагностики ионного пучка (5), который включает цилиндр Фарадея с запирающим вторичных электронов и измеритель эмиттанса с «перечницей» для быстрых измерений эмиттанса сформированного протонного пучка.

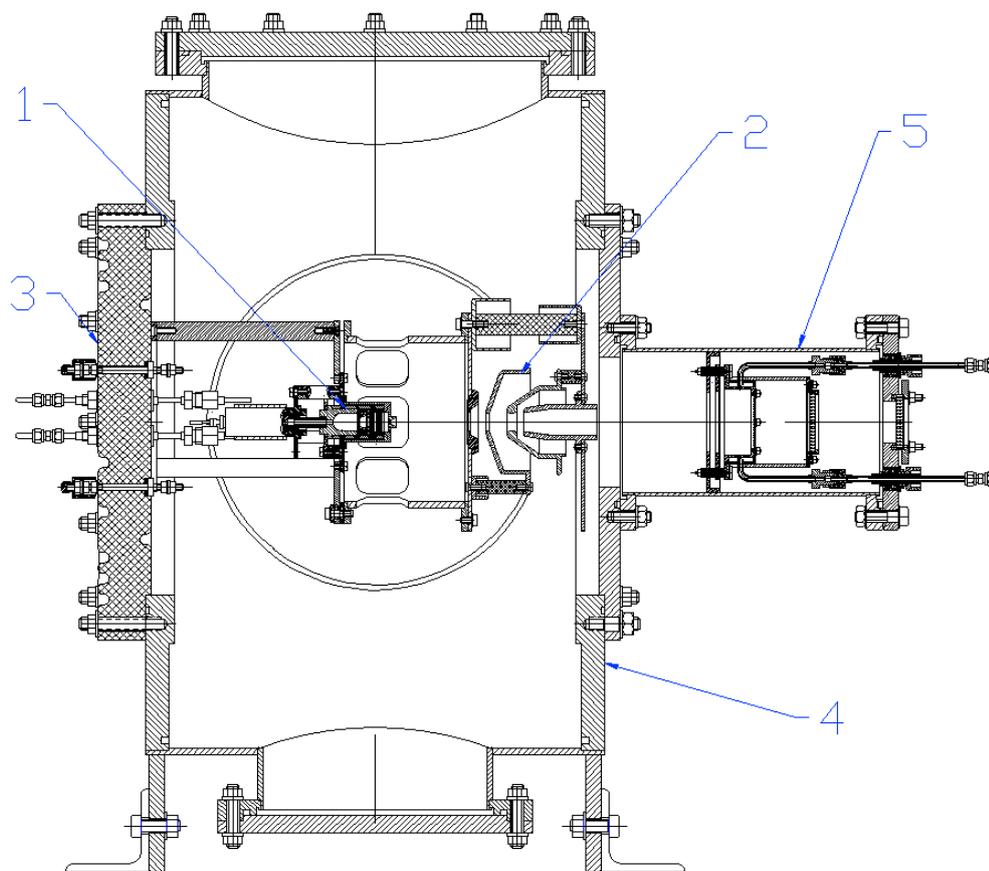


Рисунок 11 – Общий вид источника протонов. 1– источник плазмы, 2 – ионно-оптическая система формирования и ускорения протонного пучка, 3 – высоковольтный изолятор-фланец источника, 4 – вакуумная камера, 5– блок диагностики ионного пучка

Структурная схема электропитания ионного источника показана на рисунке 12. Перечень и параметры блоков питания ионного источника и блоков электрооборудования приведен в таблице 2.

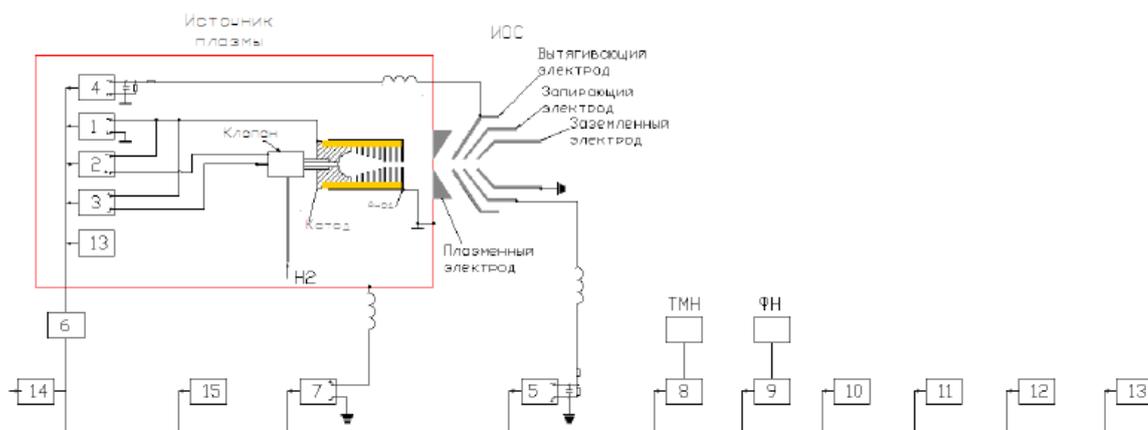


Рисунок 12 – Структурная схема электропитания стенда источника протонов. 1 – блок разряда, 2 – блок поджига, 3 – блок клапана, 4 – блок вытягивающего напряжения, 5 – блок запирающего электрода, 6 – разделительный трансформатор, 7 – генератор высоковольтных импульсов 45 кВ, 8 – блок питания ТМН, 9 – блок управления форвакуумным насосом, 10 – высоковакуумный вакуумметр, 11 – форвакуумный вакуумметр, 12 – система контроля вакуумными клапанами и затворами, 13 – система контроля и управления оборудованием источника протонов и диагностической аппаратуры, 14 – блок управления электропитанием, 15 – четырехканальный генератор задержанных импульсов

Блоки питания источника плазмы: блок разряда (1), блок поджига (2), блок клапана (3), а также блок вытягивающего напряжения (4) размещены на платформе, изолированной от земли на 45 кВ. Управление этими блоками питания осуществляется, используя оптоволоконные линии связи для передачи сигналов между модулями системы контроля и управления (СКиУ)-(13), расположенными под потенциалом земли и на высоковольтной платформе с использованием конверторов напряжение-частота и частота – напряжение.

Передача электропитания 220 В, 50 Гц для на высоковольтную платформу осуществляется через разделительный трансформатор 220/220 В, 50 Гц (6). Вторичная обмотка разделительного трансформатора изолирована от первичной на напряжение 45 кВ. Импульсное напряжение 45 кВ на высоковольтную платформу подается от высоковольтного генератора (7).

Большая часть блоков питания ионного источника и вакуумной системы размещается под потенциалом земли: блок запирающего электрода ИОС-(5), контроллер ТМН (8), блок управления форвакуумным насосом (9) и клапанами вакуумной системы (12), вакуумметры (10, 11), аппаратура системы контроля и управления ионным источником

(13), блок электропитания (14), который должен включать систему блокировок и сигнализации и четырехканальный генератор задержанных импульсов (15) для запуска импульсных блоков питания источника протонов.

Таблица 2 – Электрооборудование ионного источника

№	Наименование	Параметры нагрузки в номинальном режиме и параметры питания	Тип оборудования
1	Блок разряда источника плазмы	100 В, 300 А, имп. режим, 50 мкс, 1 Гц, 220 В, 50 Гц, 50 Вт	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН
2	Блок поджига источника плазмы	1 кВ, 100 А, имп. режим, 10 мкс, 1 Гц, 220 В, 50 Гц, 50 Вт	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН
3	Блок питания газового клапана	50 В, 30 А, имп. режим, 300 мкс, 1 Гц, 220 В, 50 Гц, 25 Вт	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН
4	Блок питания 2ого (вытягивающего) электрода ИОС	-30 кВ, 10 мА, режим пост. напр., $\pm 0.1\%$ , 220 В, 50 Гц, 50 Вт	Sh0105, ООО «Научная электроника»
5	Блок питания 3его электрода (запирание электронов) ИОС	-3 кВ, 10 мА, режим пост. напр., $\pm 0.1\%$ , 220 В, 50 Гц, 50 Вт	Sh0105, ООО «Научная электроника»
6	Разделительный трансформатор	220/220 В, 50 кВ-ая изоляция между первичной и вторичной обмотками, 220 В, 50 Гц, 500 ВА	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН
7	Блок ускоряющего напряжения	45 кВ, импульсный ток до 150 мА, режим имп. напр., 100 мкс, 1 Гц, $\pm 0.2\%$ , 220 В, 50 Гц, 100 Вт	Нестандартное оборудование, разрабатывается в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН
8	Контроллер ТМН	220 В, 50 Гц, 1000 Вт	VARIAN
9	Блок питания форвакуумного насоса	220 В, 50 Гц, 1500 Вт	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН
10	Вакууметр высоковакуумный	220 В, 50 Гц, 25 Вт	ВМБ -14, ООО "АВАКС"
11	Вакууметр форвакуумный	220 В, 50 Гц, 25 Вт	13ВТ3-003, ООО "АВАКС"
12	Блок управления клапанами вакуумной системы	220 В, 50 Гц, 800/8 Вт (при открытии/в открытом состоянии)	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК
13	Система контроля и управления блоками питания ионного источника	220 В, 50 Гц, 200 Вт.	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИИ ОУК ИЯИ РАН

14	Блок подачи эл. Мощности на ионный источник с устройствами блокировки и сигнализации	220 В, 50 Гц, 4 кВА	Нестандартное оборудование, разработанное в ЛИИИ ОУК ИЯИ РАН
15	Четырехканальный генератор задержанных импульсов	220 В, 50 Гц, 100 ВА	РГ-874, Минск, РБ

Расположение разработанных и изготовленных блоков питания и управления на высоковольтной платформе и под потенциалом земли показано на рисунке 13.



Рисунок 13 – Расположение блоков питания источника протонов в стойках на высоковольтной платформе (слева) и под потенциалом земли (справа)

## 2.2. Разработка и создание стенда отрицательных ионов водорода

Для выполнения исследовательских работ по разработке и совершенствованию источника отрицательных ионов с осесимметричной системой вытягивания и формирования велась работа по подготовке испытательного стенда. На стенде смонтирована вакуумная камера с турбомолекулярным насосом КУКУ FF-200/1300 и безмасляным форвакуумным насосом. Стенд укомплектован измерительным вакуумным оборудованием, системой водяного охлаждения с блокировочным реле, вакуумным затвором Ду 250 мм и вакуумными клапанами форвакуумной линии. Общий вид стенда приведен на рисунке 14. При пробном включении вакуумной системы в вакуумной камере

стенда получен вакуум до  $1 \times 10^{-5}$  Тор. Собрана газовая линия с двухступенчатым понижением рабочего давления, включающая водородный баллон (емкость 2 л.), понижающие редукторы 150/16 атм и 40/4 атм, отсечные газовые вентили, для подачи водорода к импульсному газовому клапану источника ионов. Ведется разработка рабочих чертежей источника отрицательных ионов на основе разработанного эскизного проекта.



Рисунок 14 - Общий вид стенда для испытаний источника отрицательных ионов

### 2.3. Модернизация других систем ускорителя

В 2024 году проводилась модернизация и исследование практически всех систем ускорителя.

Так были продолжены исследования процесса компенсации пространственного заряда протонного пучка и профиля пучка на выходе инжектора. Для исследования использовались специально разработанные профилометр ионного пучка и анализатор энергии медленных ионов, образующихся в ионном пучке в результате ионизации молекул остаточного газа быстрыми ионами пучка [1].

Профили пучка ионов водорода, измеренные на выходе из инжектора протонов при разных значениях напряжения на фокусирующем электроде ионного источника, показаны на рисунке 15. Полученные данные позволяют сделать вывод о неоднородности плазмы на

эмиссионном электроде ионного источника. Улучшение однородности плазмы позволит уменьшить поперечный эмиттанс пучка ионов водорода.

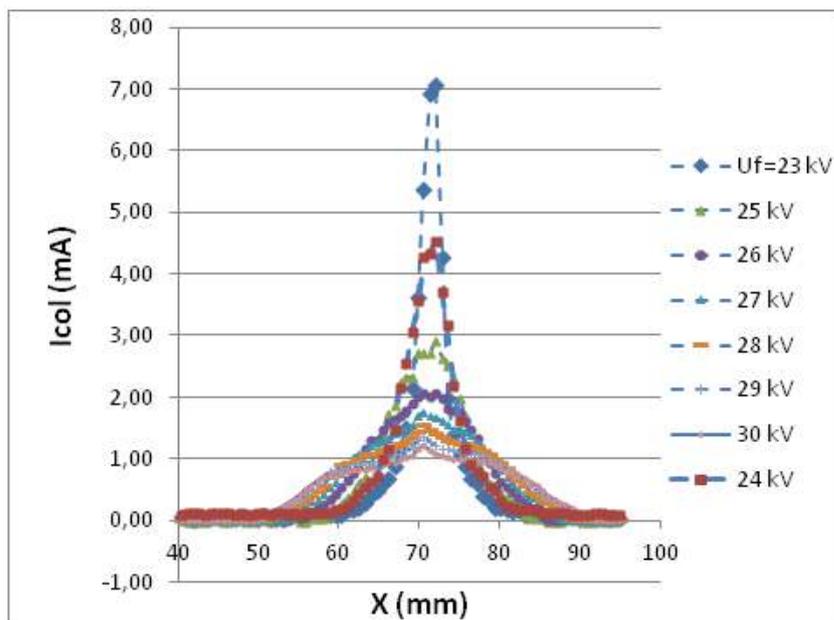


Рисунок 15 – Профили пучка ионов водорода на выходе из инжектора протонов при разных значениях напряжения на фокусирующем электроде ионного источника

На рисунке 16 показан пример зависимости среднеквадратического размера пучка ионов водорода от времени в течение импульса тока пучка. Относительное постоянство размера пучка во времени подтверждает правильность выполненной ранее настройки фокусировки пучка в ионно-оптической системе ионного источника и ускорительной трубки для обеспечения стабильности положения фазового портрета пучка в течение импульса на выходе инжектора [2].

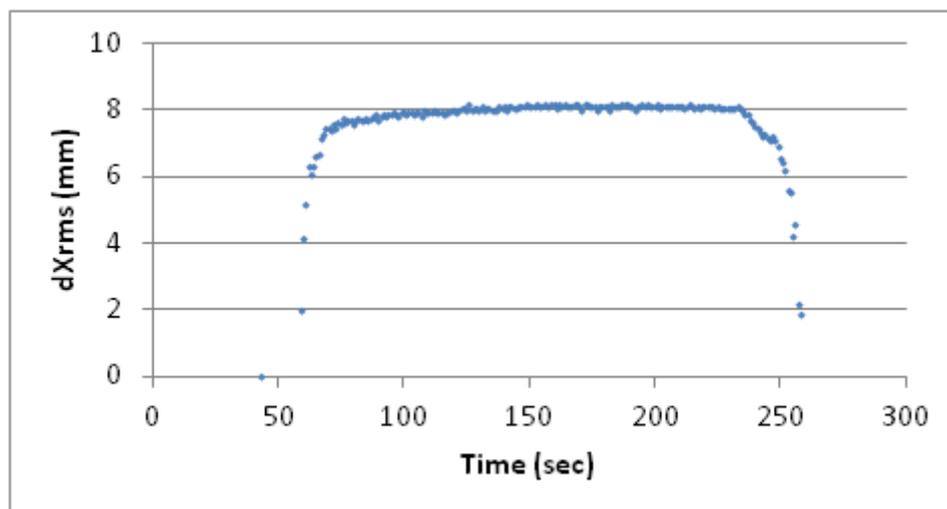


Рисунок 16 – Зависимость среднеквадратического размера пучка ионов водорода от времени в течение импульса тока пучка

По системе ВЧ питания начальной части ускорителя были продолжены исследования и доработки с целью повышения надежности работы каналов усиления. Основные проблемы обусловлены тем, что изначально запроектированные мощные генераторные (ГИ-51А и ГИ-54А) и модуляторные (ГМИ-44А) лампы были сняты с производства, что привело к необходимости замены ламп и модернизации генераторов и модуляторов под новые лампы, проводившейся на протяжении более двадцати лет. Замена генераторных ламп ГИ-51А и ГИ-54А соответственно на генераторные лампы ГИ-57А и ГИ-71А не привела к заметному снижению надежности работы. Что касается модуляторной лампы ГМИ-44А, то эквивалентной замены ей не нашлось, и по совету предприятия-изготовителя вместо нее было принято решение использовать генераторную лампу ГИ-71А. В таблице 3 приведена номенклатура ламп, установленных и работающих в настоящее время в каналах усиления (КУ) в выходном усилительном каскаде (ВУ), предвыходном усилительном каскаде (ПВУ) и модуляторе.

Таблица 3 – Номенклатура ламп в системе ВЧ питания начальной части ускорителя

№ КУ	RFQ	КУ-1	КУ-2	КУ-3	КУ-4	КУ-5	КУ-6
Рвых, МВт	0,5	1,1	2,2	2,5	1,9	0,9	1,1-2,5
Лампа ВУ	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А
Лампа ПВУ	ГИ-51А	ГИ-57А	ГИ-57А	ГИ-57А	ГИ-57А	<i>ГИ-51А</i>	ГИ-57А
Модулятор	<i>ГМИ-44А</i>	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А	ГИ-71А

При замене модуляторной лампы на генераторную было обнаружено, что требуемый ток и напряжение накала не вполне обеспечиваются, что потребовало разработки и изготовления новых высоковольтных накальных трансформаторов. На рисунке 17 показан новый трансформатор перед его установкой в модулятор канала усиления КУ-5 в ноябре 2024 года и демонтированный старый трансформатор.



Рисунок 17- Накальные трансформаторы для модуляторных ламп ГИ-71А (слева) и ГМИ-44А (справа)

Генераторная лампа ГИ-71А в качестве модуляторной обладает двумя существенными недостатками – низкой электропрочностью зазора сетка-катод и большим остаточным напряжением анод-катод. Последнее приводит к необходимости повышения анодного напряжения на 5-7 кВ, что, безусловно, повышает вероятность пробоев, но не является критическим. Что касается первого недостатка, то он оказался наиболее существенным и потребовал проведения дополнительных исследований и принятия специальных мер.

В качестве первого шага между сеткой и катодом были установлены дополнительные конденсаторы, которые, хотя и несколько ухудшают быстродействие системы стабилизации амплитуды, уменьшают перенапряжения на сетке, возникающие на заднем фронте импульса из-за энергии, накопленной во время импульса во вторичной обмотке импульсного трансформатора, через который от подмодулятора импульс подается на сетку. В качестве второго шага была отключена быстрая система прерывания импульса запуска, которая хорошо работала с лампой ГМИ-44А. Процессы, происходящие при прерывании импульса, аналогичны процессам, происходящим на заднем фронте, и также приводят к перенапряжениям в сеточной цепи. К сожалению, ни первый, ни второй методы не привели к существенному улучшению надежности работы. Наиболее радикальным оказалось отключение в первичной обмотке импульсного трансформатора диодно-резистивной цепи, которая предназначена для ограничения положительного выброса на заднем фронте импульса модулятора. При наличии положительного импульса в первичной обмотке трансформатора в его вторичной обмотке, то есть на сетке лампы, появляется отрицательный выброс, компенсирующий

положительный выброс, возникающий при выделении энергии, накопленной уже в индуктивности вторичной обмотки. Опыт работы показал, что при использовании третьего способа в установке конденсаторов в цепи сетки необходимости нет. Хотя использование второго и третьего способов не исключает возникновение пробоев, происходит быстрое восстановление лампы. Сразу после пробоя запуск модулятора задерживается на 1-2 сек, после чего работа канала восстанавливается.

По системе диагностики был разработан, установлен и введен в эксплуатацию индукционный датчик для регистрации тока и длительности импульса пучка протонов, выведенного на воздух в процедурной комплекса протонной терапии.

По системе АСУ проведены пуско-наладочные работы оборудования новой системы синхронизации с использованием оптоволоконна на начальной части линейного ускорителя и экспериментального комплекса, изготовленной в рамках программы обновления приборной базы. На рисунке 18 показано изготовленное в 2024 году оборудование для системы синхронизации основной части линейного ускорителя на испытательном стенде, работающие головные блоки системы синхронизации начальной части ускорителя и внутренний вид одного из блоков. Разработано программное обеспечение для управления новой системой синхронизации.

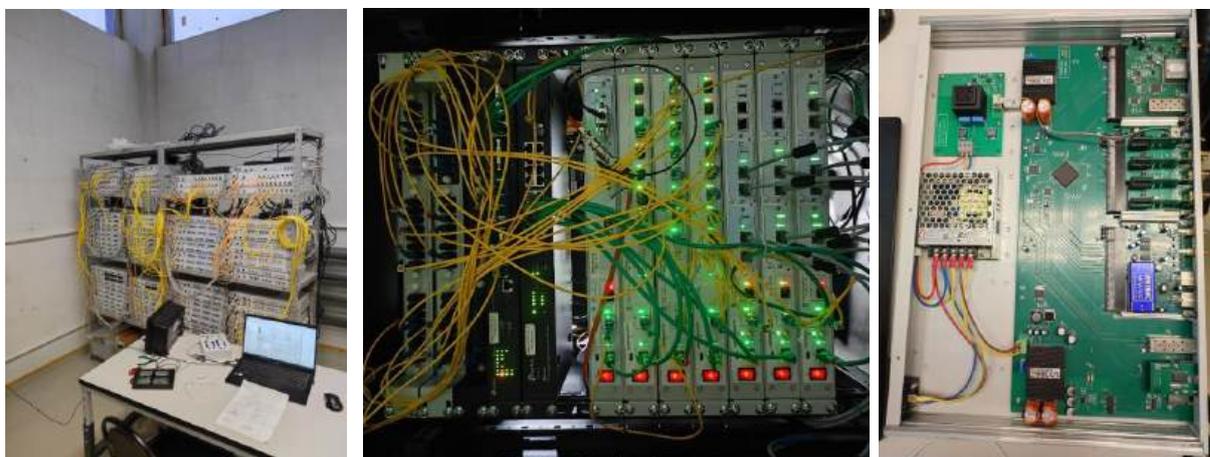


Рисунок 18 – Оборудование системы синхронизации основной части линейного ускорителя на испытательном стенде (слева), работающие головные блоки системы синхронизации начальной части ускорителя (в центре), внутренний вид одного из блоков (справа)

На системах питания электромагнитного оборудования экспериментального комплекса смонтированы и введены в действие новые программируемые источники питания постоянного тока (ИПТ) серий EA-PS 9000, EA-PSE 9000 и EA-PS 10000. Таким образом проведена замена еще восьми устаревших источников питания типа ИСТ -1000 на современные ИПТ, позволяющие осуществлять регулировку режимов с пульта ускорителя

с высокой точностью и сохранять долговременную стабильность установленных режимов. Кроме того, несколько ранее установленных ИПТ, рассчитанных для работы с пучком с энергией до 264 МэВ, в 2024 году в процессе оптимизации всей системы питания были заменены на более мощные, поэтому в настоящее время обеспечена возможность проводки пучка к установкам РАДЭКС и ИН-06 с энергией до 423 МэВ.

Налажено управление новыми ИПТ от системы управления ускорителем.

В 2024 году продолжалась модернизация вакуумной системы. Среди выполненных работ следует отметить замену на 5 секторе ускорителя старых блоков питания магниторазрядных насосов на новые ВИП-32М в количестве 52 штук (рисунок 19). При этом выполнена доработка мест установки, распайка высоковольтных, силовых и контрольных кабелей, включение новых источников в систему контроля ускорителя. Также модернизирована вакуумная система стенда облучения и пульта управления вакуумными постами, установлены новые вакуумметры на инжекционном тракте пучка Н-минус. Проводились вакуумные испытания всего создаваемого и модернизируемого оборудования, в том числе и изготовленных новых трубок дрейфа.



Рисунок 19 – Блок питания ВИП-32М в щитовой вакуумной системы 5-го сектора

В 2024г. продолжалась модернизация системы авторегулирования собственных частот ускоряющих резонаторов. Проведена модернизация шести терморегулирующих установок (ТРУ №№ 3-5, 3-7, 3-9, 3-10, 4-1 и 4-3). В результате модернизации значительно упрощена компоновка ТРУ, что облегчает их техническое обслуживание, ремонт и настройку режимов теплообмена. На рисунке 20 приведены фотографии одной из установок до и после модернизации.



Рисунок 20 – Вид терморегулирующей установки до (слева) и после (справа) модернизации

Также продолжена работа по доукомплектованию, модернизации, наладке и восстановлению работоспособности шкафного оборудования системы на ВЧ каналах 4-8...4-11 для подготовки ускорителя к работам по повышению энергии ускоренного пучка до 423 МэВ в 2025 году. В частности, разработаны и изготовлены электронные ячейки с использованием микропроцессорных цифровых измерителей-регуляторов ТРМ-12, ТРМ-202 и ТРМ-212 (рисунок 21).



Рисунок 21 – Микропроцессорные цифровые измерители-регуляторы в шкафу МГ2.Т4

Из работ, выполненных по системе быстрой аварийной защиты, отметим работы по наладке как автономной, так и в составе аппаратуры модернизированных ячеек обработки

сигналов с датчиков системы в количестве 41 штук. Комплект изготовленных ячеек показан на рисунке 22.

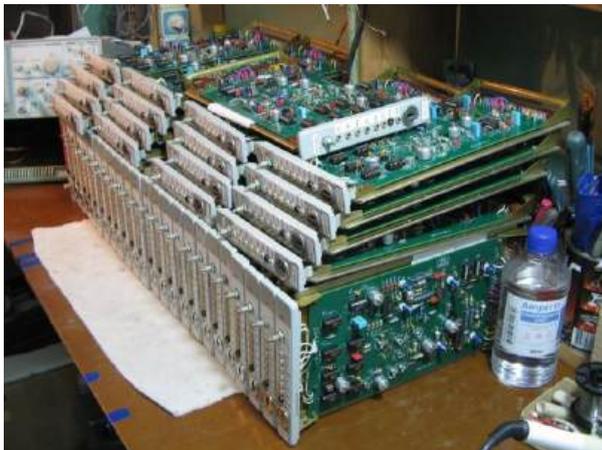


Рисунок 22 – Комплект изготовленных для системы БАЗ электронных ячеек

### 3. Разработка и создание ускорителей и их элементов

В 2024 году выполнялись работы по разработке и созданию новых ускорителей и их элементов, в том числе и в сотрудничестве с другими российскими и зарубежными центрами.

Среди выполненных работ следует отметить выполненные в сотрудничестве с ОИЯИ работы в рамках проекта NICA.

– Проведены разработка и исследования плазменного перезарядного ионизатора для источника поляризованных дейтронов и протонов. Проведен анализ схем плазменного перезарядного ионизатора источника поляризованных ионов ОИЯИ, выбрана схема ионизатора с T-образной накопительной ячейкой, поворотным магнитом, электростатическим дефлектором и спин-прецессором, показана возможность повышения качества пучка поляризованных ионов по сравнению с существующей схемой ионизатора, выработаны технические решения по схеме источника поляризованных ионов и параметрам узлов ионизатора.

– Исследованы особенности управления поляризацией протонов в окрестности целочисленного спинового резонанса в ускорителе Нуклотрон комплекса NICA [3]. Проведён анализ динамики поляризации протонов при быстром и медленном пересечении резонанса с управляющими спиновыми навигаторами на основе корректирующих диполей. Разработана схема компенсации действия несовершенств структуры ускорителя на основе измерения мощности целого резонанса и направления спинового поля. Проведённая работа подтверждает возможность управления поляризацией в режиме спиновой прозрачности при имеющихся ошибках выставки элементов в Нуклотроне.

– Исследованы особенности управления поляризацией протонов в области ВЧ спинового резонанса. Исследовались такие эффекты, как влияние гармоник ВЧ поля, продольного размера пучка, влияние внутренних и целочисленных спиновых резонансов, и отстройки по частоте на деполаризацию пучка. Предложены методы уменьшения влияния эффектов спин-декогеренции во время переворота поляризации [4]. Представлено детальное аналитическое описание влияния отстройки от резонанса на прецессию спина. Аналитически рассмотрены эффекты ВЧ спин-декогеренции, являющиеся ключевыми при перевороте поляризации пучка. Представленный метод спиновой томографии важен для оценки светимости в коллайдерных экспериментах с поляризованным пучком [5].

Продолжены исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя на энергию 230 МэВ для протонной терапии [6]. Завершена разработка [7] методики быстрой регулировки выходной энергии ускорителя в течение

одного ВЧ импульса. За счет ступенчатого изменения фазы входного ВЧ сигнала на низком уровне ВЧ мощности с шагом (порядка 1 мкс), равному времени распространения волны в безинерционной структуре на бегущей волне формируются участки с различной фазой ускоряющего поля и перемещающейся вдоль структуры фронтом раздела. Сформулированы физические принципы, определяющие границы диапазона регулировки. Ранее обоснована практическая реализуемость методики на мощном современном СВЧ оборудовании [8].

Применение разработанной методики позволит реализовать плавное и непрерывное изменение энергии пучка на  $\sim 20$  МэВ за время  $\sim 2,5$  мкс (рисунок 23). Такая скорость, определяемая величиной изменения фазы ВЧ поля, недостижима для других способов регулировки. За счёт увеличения разброса частиц сгустка по энергии, сглаживается распределение дозы по глубине. Высокая интенсивность пучка, разрабатываемого ЛУ, соответствующая  $1,5 \cdot 10^{10}$  частиц/сек позволит обеспечить высокую локальную дозу облучения и в комбинации режимов облучения применять его как для обычной, так и флэш протонной терапии.

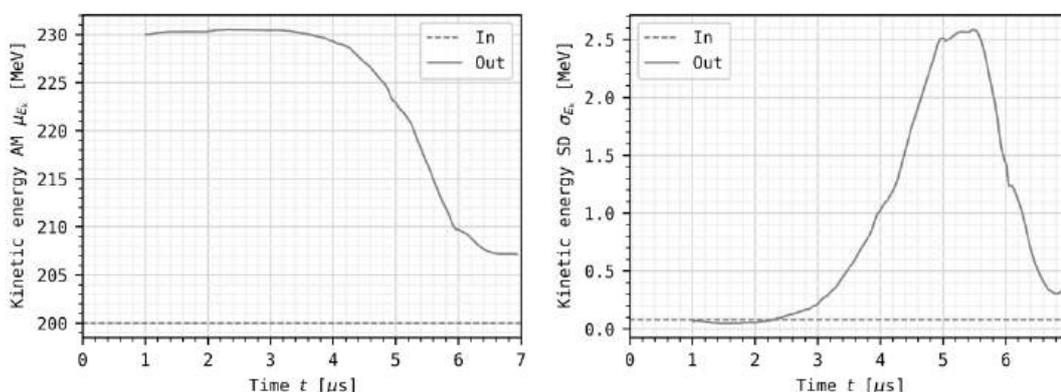


Рисунок 23 – Расчетные зависимости от времени средней энергии сгустка (слева) и ее среднеквадратичного отклонения (справа) на выходе ускорителя при регулировке только последней ускоряющей секцией

Продолжены работы по исследованию и разработке ускоряющих структур для линейных ускорителей ионов. Для структур с квази-сосредоточенными параметрами ИН (Inter digital N type) и SPR (Split Ring), имеющих высокую ВЧ эффективность и применяемых при низких энергиях ионов, характеристики существенно зависят от размеров и конфигурации трубок дрейфа. Разработана методика оптимизации и накоплена база данных для параметров трубок дрейфа (рисунок 24), перекрывающая, с возможностью масштабирования, области применения структур по рабочим частотам от  $\sim 80$  МГц до  $\sim 750$  МГц и энергии протонов  $< 20$  МэВ [9].

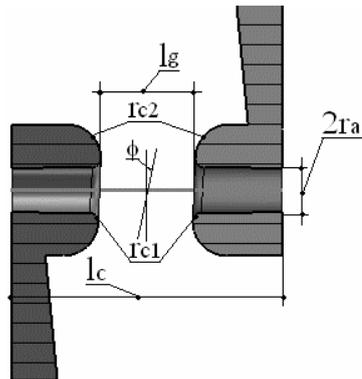


Рисунок 24 – Конфигурация и характерные размеры трубки дрейфа со скошенными торцами

Применение разработанной процедуры для одиннадцати ИВ резонаторов начальной части разрабатываемого ускорителя для протонной терапии, [10], позволило повысить их ВЧ эффективность (от 10% до 45%), понизив максимальную напряженность электрического поля на поверхности трубок (от 10% до 20%), повысить электрическую прочность, предложить конфигурацию с подавлением действия паразитной составляющей электрического поля и повысить энергию перехода в основную часть ускорителя. Разработанная база данных также позволяет восстанавливать распределение ускоряющего поля и является основой для окончательной разработки ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя, состоящего из резонаторов рассмотренного типа.

Завершено исследование метода устранения влияния паразитного колебания  $H_{11}$  на характеристики рабочего колебания в ускоряющей структуре SDTL (Separated Drift Tube Linac), применяемой для ускорения ионов водорода средних энергий [11]. Предложенное ранее [12] техническое решение по тепловой нагрузке не дает дополнительных ограничений для применения структуры в ускорителях интенсивных пучков ионов водорода.

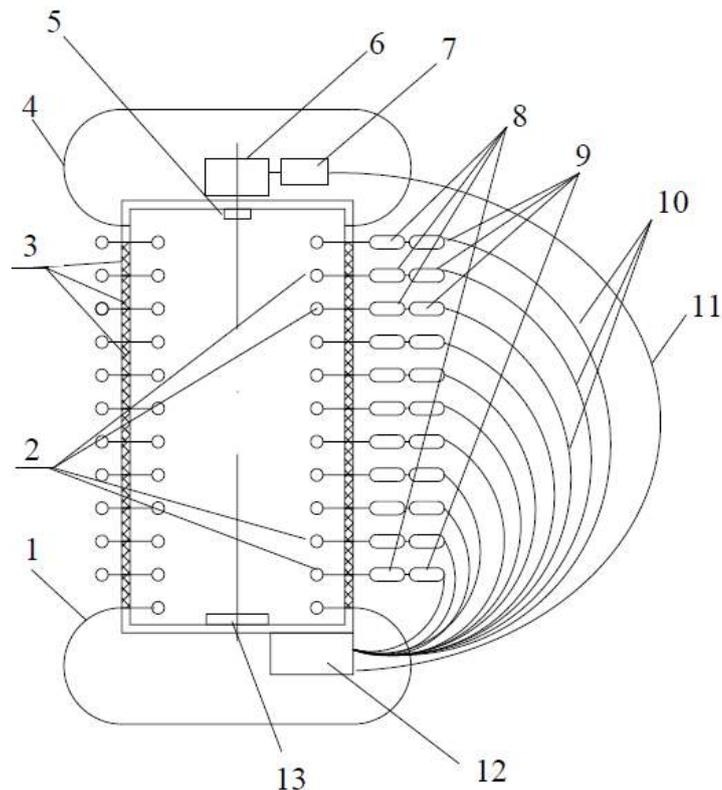
Начата разработка методики и технических предложений для комплексной оптимизации начальных частей линейных ускорителей ионов, состоящих из коротких ускоряющих резонаторов с расположенными между ними фокусирующими элементами. Целями работы являются как разработка методической основы, так и технических предложений, при обеспечении надежных условий динамики частиц, направленных на сокращение затрат на оборудование, сооружение, наладку, запуск и эксплуатацию этой части линейного ускорителя.

В соответствии с заключенным в 2022 г. Меморандумом о сотрудничестве между Институтом современной физики, Китай, Китайская Академия Наук и ИЯИ РАН в области развития ускорителей, ионных источников и источников поляризованных ионов продолжались совместные видео совещания по проблемам, связанным с разработкой

источника поляризованных ионов для Института современной физики. Проводятся исследования на стенде источника поляризованных ионов в ИЯИ РАН, связанные с сотрудничеством с Институтом современной физики.

Предложена новая схема ускорителя прямого действия. Исходя из общих представлений о том, что наилучшее качество пучка достигается при ускорении ионов в ускорителях прямого действия и с целью дальнейшего повышения их характеристик, был проведен анализ недостатков существующих электростатических ускорителей, в которых высоковольтный кондуктор заряжается переносом на него зарядов с помощью диэлектрической ленты. В частности, было отмечено принципиальное ограничение величины ускоряемого тока в таких машинах, связанное с ограничением возможной скорости механического переноса зарядов на высоковольтный электрод, которая определяется скоростью движения ленты, ее шириной и напряженностью электрического поля поверхностного заряда ленты.

С целью преодоления данного недостатка было предложено в ускорителе прямого действия отказаться от механической системы зарядки высоковольтного электрода, вместо этого использовать цепь последовательно соединенных источников напряжения с индивидуальным электрическим питанием этих источников от фотоэлектрических преобразователей (рисунок 25). При этом на оптический вход каждого фотоэлектрического преобразователя подается излучение по волоконно-оптическим линиям передачи от источников лазерного излучения. Лазерные источники излучения с подходящими характеристиками доступны на рынке. Для задания потенциалов на промежуточных электродах источники напряжения при этом необходимо соединить с промежуточными электродами ускорительной трубки. Контроль и управление указанными источниками напряжения осуществляется через оптические или иные беспроводные линии связи. На данное предложение была подготовлена заявка на изобретение «Ускоритель заряженных частиц» и получен патент [13].



1 – низковольтный электрод, 2 – промежуточные электроды, 3 – изоляторы, 4 – высоковольтный электрод, 5 – источник заряженных частиц, 6 – система питания источника заряженных частиц, 7 – фотоэлектрический преобразователь для электропитания источника заряженных частиц, 8 – источники напряжения, 9 – фотоэлектрические преобразователи для электропитания источников напряжения, 10 – волоконно-оптические линии передачи излучения для питания источников напряжения, 11 – волоконно-оптическая линия передачи излучения для питания источника заряженных частиц, 12 – источники излучения, 13 – приемник пучка заряженных частиц

Рисунок 25 – Схема ускорителя заряженных частиц

Реализация изобретения с использованием доступных в настоящее время фотоэлектрических преобразователей и лазерных источников излучения может позволить увеличить ток пучка высоковольтного ускорителя с 50 ... 100 мкА до 1 мА и выше.

В течение 2024 года был выполнен комплекс работ по разработке систем диагностики для существующих и проектируемых в России линейных ускорителей протонов, отрицательных ионов водорода и легких ионов:

- В рамках реализации мероприятий Национального центра физики и математики были изготовлены макеты датчиков положения и фазы пучка (рисунок 26). Проведенные измерения характеристик датчиков подтвердили правильность принятых решений и продемонстрировали хорошее совпадение с расчетными параметрами.

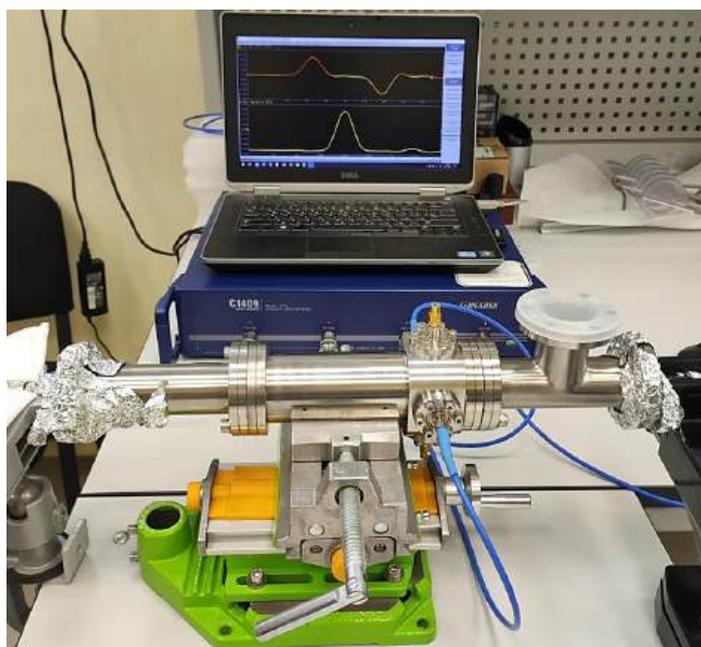


Рисунок 26 – Тестовый макет датчика положения и фазы пучка на измерительном стенде

– Изготовлена вторая очередь устройств системы диагностики линейного ускорителя протонов и легких ионов в составе исследовательского ускорительно-накопительного комплекса ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

– Проведено эскизное проектирование устройств диагностики пучка линейного ускорителя отрицательных ионов водорода в составе исследовательского ускорительно-накопительного комплекса ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

– В сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский Институт» по реализации мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры были изготовлены индукционные датчики тока и электроника, необходимая для организации работы системы аварийного контроля потерь пучка по разнице токов, для сильноточного линейного ускорителя протонов в составе проекта исследовательского компактного источника нейтронов DARIA [14].

В рамках сотрудничества с НИЦ «Курчатовский Институт» разработан эскизный проект элементов источника отрицательных ионов водорода. Выбрана конфигурация источника, разработаны 3-d модели магнитной системы и системы вытягивания и доускорения ионов (рисунок 27), выполнено численное моделирование магнитных полей в системе, оптимизация весогабаритных характеристик. проведено численное моделирование формирования пучка в системе вытягивания и доускорения.

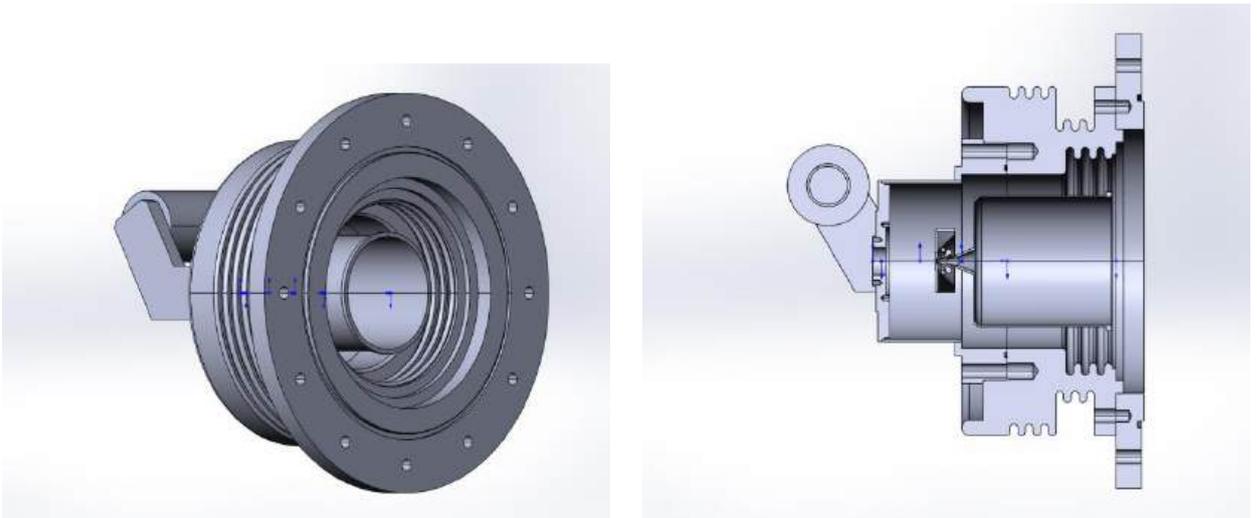


Рисунок 27 – Общий вид (слева) и разрез (справа) системы вытягивания, доускорения и магнитной системы с изолятором 60 кВ и фланцем вакуумной системы

Результаты численного моделирования системы вытягивания и формирования пучка из источника отрицательных ионов в трехэлектродной системе вытягивания и доускорения до 60 кВ показали обоснованность применения осесимметричной системы. Для окончательного выбора размера вытягивающего промежутка и проверки электрической прочности системы вытягивания и ее эмиссионной способности необходимо проведение макетирования источника.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2024 год выполнен. Получены значимые научные результаты.

### **1. Задача «Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН».**

В 2024 году проведено 2 сеанса продолжительностью 360 часов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В первом сеансе работы велись на нейтронный источник РАДЭКС, комплекс протонной терапии и на экспериментальный стенд с энергиями 267 МэВ и 160 МэВ. В зависимости от задачи интенсивность пучка изменялась от 100 нА при работе на комплекс протонной терапии до десятков микроампер среднего тока при работе на РАДЭКС, а длительность импульса – от 0,3 мкс до 150 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до десятков герц. Для исследований по флэш терапии при работе на комплекс протонной терапии формировались одиночные импульсы высокой интенсивности. Второй сеанс был посвящен комплексной наладке оборудования и систем ускорителя, исследованиям режимов работы и настройке ускорителя. Работы велись с малой интенсивностью пучка.

Относительно небольшое по сравнению с предыдущими годами количество проведенных сеансов и их суммарная длительность в отчетный период были обусловлены авариями в системе оборотного водоснабжения, в том числе на трубопроводах системы и трубопроводе подпитки системы от очистных сооружений города. Существенное ограничение на режимы работы ускорителя оказало окончание срока действия разрешения Ростехнадзора на выбросы радиоактивных веществ в атмосферу и необходимость разработки нового Проекта нормативов выбросов и новой Инвентаризации источников выбросов в связи с изменением требований к проектной документации, а также методик и рекомендаций. Работа ускорителя велась в режимах, исключая регистрируемые выбросы.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя.

### **2. Задача «Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН».**

Основной объем оборудования ускорителя был изготовлен в 80-х годах прошлого столетия. Для обеспечения работы ускорителя постоянно проводятся работы по модернизации. Описаны работы по модернизации систем ускорителя, выполненные в 2024 году. Велись работы по модернизации источников протонов и отрицательных ионов

водорода. Для выполнения этих работ, а также работ по созданию новых источников начато создание двух исследовательских стендов. Среди других работ по модернизации ускорителя следует выделить модернизацию системы синхронизации, системы ВЧ питания, системы питания электромагнитного оборудования, системы управления, системы терморегулирования собственной частоты ускоряющих резонаторов, вакуумной системы, системы быстрой аварийной защиты и других систем. В связи с имевшимися ограничениями в проведении сеансов работы ускорителя объем работ по модернизации систем ускорителя в отчетный период был расширен.

### **3. Задача «Разработка и создание ускорителей и их элементов».**

Среди выполненных в 2024 году работ следует отметить выполненные в сотрудничестве с ОИЯИ в рамках проекта NISA работы по разработке плазменного перезарядного ионизатора для источника поляризованных дейтронов и протонов, а также по исследованию особенностей управления поляризацией в области целочисленного спинового резонанса и в области высокочастотного спинового резонанса. В сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский Институт» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» велись работы по разработке устройств и систем диагностики пучка для линейных ускорителей ионов и изготовление отдельных устройств. Продолжались исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя на энергию 230 МэВ для протонной терапии, а также исследования и разработка эффективных ускоряющих структур для линейных ускорителей ионов. Также была предложена и разработана новая схема ускорителя прямого действия с использованием последовательности источников напряжения с индивидуальным электрическим питанием этих источников от фотоэлектрических преобразователей, получен патент на изобретение.

В рамках сотрудничества ИЯИ РАН и Институтом современной физики, Китайская Академия Наук, проводились работы по разработке источника поляризованных ионов для Института современной физики, включая исследования на стенде источника поляризованных ионов в ИЯИ РАН.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Study of space charge compensation process of a 400 KeV pulsed hydrogen ion beam / Belov A. S. [et al.] // Proc. 27th Russian Particle Acc. Conf., RuPAC2021. – Alushta, Russia. – JACoW Publishing, TUPSB39. – P. 313-315, [doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB39](https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB39).
- 2 Белов А.С. Схемы плазменного перезарядного ионизатора с использованием Т-образной накопительной ячейки // Совещание «Поляризованные источники, поляриметрия, спиновая физика высоких энергий на Ускорительном комплексе ЛФВЭ ОИЯИ». – Дубна, ОИЯИ. – 30-31 Октября, 2024.
- 3 Compensation of the polarization effect of imperfection of the Nuclotron/JINR lattice in the vicinity of an integer resonance / Filatov Y. [et al.] // JETP Lett. – 2025. – №10. – to be published.
- 4 Investigation of methods to decrease proton beam depolarization while using an RF spin-rotator / Melnikov A. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Vol. 86, № 11. – P. 2429 - 2433. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778823110303>.
- 5 Spin decoherence and off-resonance behavior of radio-frequency-driven spin rotations in storage rings / N. Nikolaev [et al.] // Physical Review Accelerators and Beams – 27, 111002. – URL: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.27.111002>.
- 6 Paramonov V., Durkin A.P., Kolomiets A. A Linear Accelerator for Proton Therapy // Proc. RuPAC2021, FRB04. – 2021. – P. 117. – [doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04](https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04).
- 7 Овчинникова Л., Дуркин А., Парамонов В. Особенности быстрой регулировки выходной энергии в линейном ускорителе для протонной терапии // Труды 10-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2024», НИЯУ МИФИ. – 2024. – С. 327.
- 8 Овчинникова Л. Парамонов В. Методика моделирования распространения СВЧ сигнала в TW структуре ускорителя протонов для медицины // Труды 9-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2023» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. – 2023. – С. 300.
- 9 Рыбаков И. Парамонов В. Оптимизация параметров трубок дрейфа в структурах ИИ и SPR. // Труды 10-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2023», НИЯУ МИФИ. – 2024. – С. 324.
- 10 Paramonov V., Durkin A., Kolomiets A. Initial Part of a Compact Proton Linac for Applied Purposes // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2020. – Vol. 17, № 4 – P. 624-628. [doi: 10.1134/S1547477120040366](https://doi.org/10.1134/S1547477120040366).

11 Парамонов В.В. Смещение колебаний типа Н из окрестности рабочей моды в ускоряющей структуре SDTL / Труды 10-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2023»/ НИЯУ МИФИ. – 2024. – С. 353.

12 Парамонов В.В. Ускоряющий резонатор // Патент РФ N 2808701. 2023. Бюллетень № 34. URL <https://fips.ru/EGD/3874d0cf-c100-4d22-8adc-3ee065251db0>.

13 Кленов В. С. Заявка на изобретение «Ускоритель заряженных частиц» // Патент № RU 2 822 244. 2024. Бюл. № 19.

14 Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. The proton linac for compact neutron source DARIA // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – Vol. 13, № 6. – P. 1126-1131. – <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2023 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Investigation of methods to decrease proton beam depolarization while using an RF spin-rotator / Melnikov A. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Vol. 86, № 11. – P. 2429-2433. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778823110303>.

2. Spin decoherence and off-resonance behavior of radio-frequency-driven spin rotations in storage rings / Nikolaev N. [et al.] // Physical Review Accelerators and Beams. – Vol. 27. – P. 111002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.27.111002>.

3. Compensation of the polarization effect of imperfection of the Nuclotron/JINR lattice in the vicinity of an integer resonance / Filatov Y. [et al.] // JETP Lett. – 2025. – №10.

А.2 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ.

1. Овчинникова Л., Дуркин А., Парамонов В. Особенности быстрой регулировки выходной энергии в линейном ускорителе для протонной терапии // Труды 10-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2024», НИЯУ МИФИ. – 2024. – С. 327.

2. Рыбаков И. Парамонов В. Оптимизация параметров трубок дрейфа в структурах ИИ и SPR. // Труды 10-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2023», НИЯУ МИФИ. – 2024. – С. 324.

3. Парамонов В.В. Смещение колебаний типа Н из окрестности рабочей моды в ускоряющей структуре SDTL // Труды 10-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2023»/ НИЯУ МИФИ. – 2024. – С. 353.

А.3 Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ, баз данных, иные РИД, имеющие официальную регистрацию.

1. Кленов В. С. Заявка на изобретение «Ускоритель заряженных частиц» // Патент № RU 2 822 244. 2024. Бюл. № 19.

А.4 Иные публикации по теме.

1. Белов А.С. Схемы плазменного перезарядного ионизатора с использованием Т-образной накопительной ячейки // Совещание «Поляризованные источники,

поляриметрия, спиновая физика высоких энергий на Ускорительном комплексе ЛФВЭ ОИЯИ». – Дубна, ОИЯИ. – 30-31 Октября, 2024.

2. Output Energy Regulation During RF Pulse in Proton Linac for Medicine / Ovchinnikova L. Yu. [et al.] // *Siberian Journal of Physics*. – 2024. – Vol. 19, № 1. – P. 34-42. – <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42>.